动作如何影响元认知？——基于认知模型和神经机制的探讨*

程晓荣[#] 仇式明[#] 定险峰 范炤

(青少年网络心理与行为教育部重点实验室(华中师范大学)；人的发展与心理健康湖北省重点实验室；华中师范大学心理学院，武汉 430079)

摘要 动作与元认知是认知加工的重要环节。元认知体现个体对认知过程的表征、监控与调控；动作则是输出内部认知加工，尤其是决策信息的重要手段。研究表明，动作的各个方面(如反应速度、反应强度、反应顺序、反应冲突及反应观察等)均影响元认知。从认知模型角度，元认知的决策后模型较好地适用于解释动作影响元认知的相关实验证据。该类模型认为用于元认知评估的信息（元认知证据）与用于知觉判断的信息（知觉证据）不同但相关，并分别侧重于层级加工、贝叶斯计算、信心增效等方面。从神经机制角度，动作与知觉信息可能通过以额叶皮层为核心的脑网络整合，依托 β 振荡和 α 抑制等电生理机制，在注意调控下形成元认知。未来研究可以进一步探讨动作改变元认知的边界条件、信心反映的真实含义，以及特殊人群的元认知表现等。

关键词 动作，元认知，知觉判断，信心评估，认知神经机制

分类号 B842

1 引言

人类认识和改造世界的前提是拥有一个稳定、高效的认知加工系统。动作(action)和元认知(metacognition)是认知加工系统中不可或缺的两个重要环节。作为对认知的认知(MacNeil et al., 2024)，元认知体现出个体表征、监控和控制心理功能的能力(Boldt & Gilbert, 2022; Fleming, 2024; Rausch et al., 2023)，使个体能够评估自己的选择(choices)、动作(actions)和表现(performance)的质量，并在缺乏外部反馈时及时调整当前行为、优化未来决策。有效的元认知表现在对自己一级(first-order)决策的合理二级(second-order)评估，尤其是对决策的信心判断(confidence judgement)足够有效。决策任务之后的信心报告被广泛视为衡量元认知的关键指标。在金融投资(Dhingra & Yadav, 2024) 、医疗诊断(Al-Maghrabi et al., 2024)、

收稿日期：2024-07-26

* 国家社会科学基金教育学一般课题“儿童‘体力/认知权衡’能力：心理加工机制及其干预研究”（项目编号：BBA210036）资助

程晓荣和仇式明为本文共同第一作者

通信作者：范炤，E-mail: z.fan@ccnu.edu.cn

法庭审判(Lebensfeld & Smalarz, 2024)和政治决策(Milshtein et al., 2024)等高风险领域和社会交往中，对自己的决策有正确的信心判断以及对他人的决策信心有正确的理解，都具有重要的适应意义。

传统认知心理学多聚焦于“动作无关”(action-free)的纯认知活动。但近年来，研究者逐渐开始重视动作表征和加工在认知中的作用。动作是输出内部加工信息的手段。狭义的动作指外显、可测量的肌肉反应，包括阈下激活(Gajdos et al., 2019)、动作准备(Wokke et al., 2020)和动作执行(Pereira et al., 2020)。近期大量文献支持动作观察和动作执行有着部分共享的神经机制(Cardellicchio et al., 2020)，因此广义的动作还可以扩展到观察他人动作(Charles et al., 2020)或想象自我动作(Chye et al., 2022)所引发的运动皮层激活，以及经颅电/磁刺激(transcranial current/magnetic stimulation, TCS/TMS)等设备对运动中枢神经活动的干扰。无论定义如何，动作都是输出内部认知加工、特别是决策信息的重要手段，为揭示认知“黑匣子”与外部世界的交互提供重要线索。

本文聚焦于知觉任务中动作对元认知的影响。早期知觉模型认为，信心判断主要基于感觉加工的质量或强度(Pezzetta et al., 2022)。因此，并不预期知觉加工之后的动作会对知觉决策的信心有影响。然而，随着运动认知(Motor cognition)研究的深入，研究者在运动中枢中也发现知觉决策信号，表明动作与信心判断存在密切联系(Wokke et al., 2020)。近期，越来越多的研究表明动作确实可以直接影响信心判断，即改变元认知(Faivre et al., 2020; Fleming et al., 2015; Mazancieux et al., 2023; Palser et al., 2018; Sanchez et al., 2024; Siedlecka et al., 2021; Wokke et al., 2020)。这些发现表明，元认知并非“动作无关”，而是严重依赖动作系统的激活与参与。

动作影响元认知的研究不仅可以推动元认知理论的发展，还有助于拓展动作与认知(Chye et al., 2022)、知觉与决策(Mamassian & de Gardelle, 2022)、具身认知(Wokke et al., 2020)、证据整合与累积(Mazancieux et al., 2023)等研究前沿。本文系统梳理了动作影响元认知的实验证据，探讨了相关的认知模型和神经机制，并试图厘清动作影响元认知的诸多争论（其核心为知觉证据与元认知证据的依存程度、关联方式和组织结构），最后对未来研究提出若干展望。

2 动作改变元认知的实验证据

知觉元认知的经典研究范式是先进行知觉反应，再报告元认知，即报告对反应的信心(Gajdos et al., 2019)。因此，知觉判断被称为第一类(type I)任务，而信心判断则被称为第二

类(type II)任务(Maniscalco & Lau, 2012)。除了原始的信心评分外，还通过计算知觉判断与信心评分之间的关系衍生出一些衡量元认知能力的指标(请见综述 Fleming & Lau, 2014; Rausch et al., 2023)。主要包括：1.元认知偏差(metacognition bias)，即在知觉表现相同的情况下，被试整体上表现出过高或过低的信心，又称第二类偏差。2.元认知敏感性(metacognition sensitivity)，反映被试正确区分正确和错误判断的能力，又称元认知正确率或第二类敏感性/辨别力。其常用指标包括第二类 ROC 曲线下面积(AUROC2) (Fleming & Lau, 2014)和 meta-d'(Maniscalco & Lau, 2012)。3.元认知效率(metacognitive efficiency)，指特定客观任务表现(d’)下的元认知敏感性水平，通常用 meta d’/d’衡量，也称为 Mratio (Fleming & Lau, 2014)。4.信心-正确率回归斜率，一些研究利用回归分析，通过信心和实验条件来预测知觉反应正确率，并将回归斜率作为衡量元认知能力的指标(Faivre et al., 2020)。

先前研究认为，信心判断完全依赖知觉证据(见综述 Yeung & Summerfield, 2012)。然而，越来越多的研究表明，客观知觉表现与主观信心判断之间存在分离(Di Luzio et al., 2022)。例如，Wokke 等人(2017)发现，知觉决策利用所有视觉信息，而元认知决策仅依赖部分信息。这种分离还体现在“表现匹配/信心不同” (MPDC, matched-performance/different-confidence)现象中(Maniscalco et al., 2020; Rollwage et al., 2020)。具体表现为，在不同实验条件下，尽管知觉任务成绩相同，信心判断却存在显著差异，可能是因为反应动作为信心判断提供了额外证据。最近，Siedlecka 等人(2021)比较了有动作反应与无动作反应的元认知表现，发现无论反应正确与否，有动作反应的信心判断均高于无动作反应。此外，Charles 等人 (2020) 的研究表明，与被动运动(passive action)相比，自主运动(voluntary action)条件下被试报告了更高的信心，表现出更大的元认知偏差。上述研究均表明，一级判断与元认知判断可能基于不同的信息来源。信心判断不仅依赖感知觉信息，还可能受到知觉-运动加工路径中其他因素的影响。以下将从动作的不同方面探讨其对元认知的影响。

2.1 对运动皮层的干扰影响元认知

研究表明，干扰与动作相关的运动皮层会影响元认知，这为动作改变元认知提供了直接证据。前额叶皮层(prefrontal cortex，PFC)是与元认知紧密相关的核心脑区(Geurts et al., 2022; Lapate et al., 2020)。对其施加连续 theta 节律刺激(Theta Burst Stimulation, cTBS)可显著提高元认知效率(Hobot et al., 2023)。此外，前额叶皮层通过神经连接与前运动皮层(premotor cortex)有直接关联。Fleming 等人(2015)的研究要求被试判断光栅刺激出现在屏幕左侧或右侧，同时对前运动皮层施加单脉冲经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation,

TMS)。结果显示，TMS 对知觉判断无显著影响，但在信心判断上表现出一致性效应：当TMS 施加的脑区与反应手一致（对侧）时，信心评分显著高于不一致时（同侧）。然而，在初级运动皮层(primary motor cortex, M1)(Palmer et al., 2016)上重复实验时未观察到类似效应。此外，研究发现，当运动系统受到干扰时，不仅信心判断会发生变化，对刺激的主观知觉意识判断也会受到影响(Hobot et al., 2020)。这些研究表明，前运动皮层中与前额叶皮层相连的高级运动表征对知觉信心具有重要作用，而初级运动皮层则与元认知无关。综上，直接干扰前额叶皮层或通过运动皮层的间接干扰均可改变元认知，后者可能通过前运动皮层的高级表征对信心判断产生影响。

2.2 反应速度影响元认知

研究发现，动作反应速度与元认知密切相关。例如，在要求被试通过移动弹珠（向左或向右）对光栅明度进行迫选判断的任务中，弹珠移动速度与信心呈正相关——速度越快，信心越高(Patel et al., 2012)。其它研究也表明，知觉反应时与信心负相关——反应时越短，信心越高(Filevich et al., 2020; Overhoff et al., 2022; Rahnev et al., 2020)。此外，Palser 等人(2018)使用启动范式发现，当反应速度被启动至超过自然水平时，会干扰被试对自身表现的信心判断，表现为对错误试次信心的增强。这些研究表明，反应效应器的反馈信息参与了元认知加工。部分学者认为，反应越快、信心越高的现象可能源于反应流畅性(Brouillet et al., 2023)，即反应越平滑、越轻松，信心越强。然而，近期研究发现，反应流畅性的作用具有条件性，而反应动作的精确性对元认知的影响更为直接，甚至在某些情况下掩盖了反应流畅性的作用(Sancheze et al., 2024)。例如，Sanchez 等人(2024)的研究表明，动作精确性直接反映监控程度，精确性越高，监控程度和信心越高。这一结果表明，元认知受动作精确性而非反应流畅性的主导影响。

2.3 动作强度影响元认知

多大强度的动作能影响元认知？近期研究表明，即使是阈下行为反应也能对元认知产生影响(Gajdos et al., 2019) 。在 Gajdos 等人的研究中，被试用左右手拇指按键判断光栅朝向，同时记录拇短屈肌的肌电信号。按键反应前的肌电活动反映了运动准备过程，由于尚未产生外显动作，被称为阈下动作。分析显示，部分试次在按键前出现阈下动作激活，这些试次的信心评分高于无阈下激活的试次，而光栅朝向判断结果未受影响。这表明，运动准备或相关潜在变量可影响信心，与元认知整合知觉-动作通路信息的观点一致。除了阈下动作，个体感知到的阈上动作强度同样会影响元认知。Turner 等人(2021) 探讨了不同体力

消耗对知觉任务元认知的影响。在实验中，被试通过施加不同握力强度（分别为最大握力的 20%、40%或 60%）判断左右方块的明度，并随后进行信心评分。结果显示，握力强度越大，被试的信心评分越高。类似现象也出现在以知觉意识评估为 Type2 任务的研究中(Qiu et al., 2024)，即更高的握力强度会导致更高的主观知觉意识评分。

2.4 反应顺序影响元认知

信心判断通常发生在知觉反应之后，因此可能受到先前动作的影响。已有研究通过操纵知觉决策与信心判断在实验中的相对顺序，探讨了反应顺序对元认知的作用。例如，Siedlecka 等人(2016)要求被试根据呈现的字母组成单词，并判断目标单词是否与其所组成的单词一致。研究操纵了信心判断的顺序，发现发生在知觉反应之后的信心判断比在知觉反应之前的信心判断更为准确。近期，Wokke 等人(Wokke et al., 2020) 进一步研究了动作反应信息和信心判断时间点对元认知的影响。被试需要判断运动点阵中占多数的点的颜色，信心判断分为三种情况：在颜色判断之后（有实际动作）、在颜色判断之前但在颜色判断线索之后（无实际动作但有动作准备）、在判断线索之前（动作和动作准备都没有）。随着信心判断的位置前移，可用的动作信息逐渐减少。结果显示，基于知觉反应后的信心判断元认知效率显著高于缺乏动作信息时。

2.5 动作冲突信息影响元认知

动作冲突信息对元认知的影响主要体现在两方面：一是感觉运动冲突(sensorimotor conflict)，即动作运动信号与躯体感觉信号不协调；二是反应线索与实际反应之间的冲突。对于感觉运动冲突，Faivre 等人(2020)的研究设置两个条件：动作与感觉同步，以及 500ms 延迟（即感觉运动冲突条件）。在同步或冲突状态持续 10 秒后，被试完成声音时序判断及信心评估。结果显示，时序判断在两种条件下无显著差异，但感觉运动冲突显著降低了信心评估。对于反应线索冲突，Siedlecka 等人(2020)要求被试判断左右两张图片中哪张包含更多圆点，并在刺激后呈现一致（如左右箭头）或不一致（如上下箭头）的反应线索。结果表明，一致线索提高了后续信心评估。同样的线索一致性效应也出现在以知觉意识作为元认知指标的研究中(Siedlecka et al., 2019)。然而，Sanchez 等人(2023)发现，当反应线索出现在刺激之前时，结果与上述研究相反：不一致的反应线索（如左向箭头表示左手反应）与实际反应（如用右手）导致更高的信心评估。研究者认为，这可能源于反应准备阶段的空间表征被监控并用于信心判断。当反应线索与实际反应不一致时，需要强化对空间表征的控制并抑制无关表征，这种额外的控制提高了信心评估。

2.6 观察他人动作改变元认知

除了自身动作能够改变元认知外，观察他人动作同样会对元认知产生影响。Patel 等人(2012)要求被试完成一个知觉迫选任务并进行元认知判断，然后通过录像观看他人完成同样任务，并推断他人的信心。结果显示，录像中他人反应速度越快，被试对其信心的推断越高。此外，该推断还依赖于被试自身的任务表现：当被试的反应速度比录像中的他人慢时，被试倾向于推断他人的信心高于自己。这表明，被试基于自身表现推断他人的信心。不仅观察和比较他人反应速度可以改变元认知，对运动系统的直接干扰也会影响基于观察他人动作的元认知判断。Palmer 等人(2016) 采用类似的运动观察范式，发现通过在初级运动皮层(M1)施加连续 Theta 节律磁刺激，可以改变被试对他人信心的推断。这一结果与前文提到的对 M1 进行 TMS 干扰后元认知未发生改变的研究(Fleming et al., 2015)不一致。但是，这两个研究的范式不同：前者关注观察他人动作，后者研究自身动作。这提示观察他人动作与自身动作对元认知的影响可能涉及不同的脑区机制，有待进一步研究。

3 动作改变元认知的认知和神经机制

上述的实证研究表明动作加工的各个方面对元认知都能产生显著影响，但其背后的认知和神经机制尚不明确，尚未得到统一定论。下文结合现有元认知模型，对动作改变元认知的认知和神经机制进行探讨。

3.1 动作改变元认知的认知模型

当前越来越多的理论认为，知觉证据和元认知证据之间存在区分，而动作在许多情况下会对元认知产生影响。如何构建动作改变元认知的认知模型？这一问题本质上是探讨知觉判断与元认知判断所依赖证据的关系——即两种证据的依存程度、关联方式和组织结构。具体而言，知觉证据与元认知证据是否独立？若不独立，两者以何种方式关联？存在关联的两种证据又以何种结构和组织方式在两类判断中发挥作用？早期研究主要围绕两种极端假设展开。单一通道(single channel)模型认为，知觉判断和元认知决策依赖于同一份感知证据，二者来源相同(Shekhar & Rahnev, 2021)。然而，该模型无法解释知觉判断与元认知分离的现象，也无法支持动作对元认知的影响。相对的，双通道(dual channel)模型强调，知觉判断和元认知决策依赖于完全不同的感知证据，或者源于独立的平行加工，只不过某类证据或者某种加工一定程度上会同时影响两种决策(Maniscalco & Lau, 2016)。尽管双通道模型能部分解释知觉与元认知的分离，但其完全割裂两类证据的假设与实证研究不符。当前理论更倾向于认为，知觉和元认知决策所依赖的证据既非完全独立，也非完全相同，而是

存在一定关联。然而，这种关联的具体方式及证据的积累机制仍在探索中(Fleming & Daw, 2017; Pleskac & Busemeyer, 2010)。部分理论提出，信心形成于知觉决策过程中——即决策前(pre-decisional)模型(Lee et al., 2023)，但更多研究表明，只有当信心评估发生在知觉决策之后，动作信息才能影响元认知(Wokke et al., 2020)。因此，当前的实验证据逐渐汇聚到支持决策后(post-decisional)模型，即动作提供的感觉运动信息在知觉决策之后（而非之前）对元认知产生影响。即便知觉决策结束，信心证据仍在动态积累，并持续影响元认知(Desender et al., 2021; Mazancieux et al., 2023)。以下是主要的决策后模型。

3.1.1 层级模型

层级模型(Lau & Rosenthal, 2011)通过修改元认知的加工方式，而非引入独立的元认知证据来源，解释了动作如何改变元认知以及知觉表现与元认知表现相分离的现象。该模型认为，知觉决策和元认知决策可能基于相同的证据，但证据的来源或质量不同，更重要的是证据的加工方式和组织结构逐步分化。根据层级模型，首先，加工模式是层级的(hierarchical)——对相同证据的不同加工均被组织为层级模式，新加工不断引入新噪音，改写证据的层级结构；其次，加工模式是序列的(sequential)——早期加工产生客观决策，晚期加工继承早期加工的证据并进行评价，产生主观决策(Maniscalco & Lau, 2016)。层级模型的代表之一是两阶段动态信号检测(two-stage dynamic signal detection)理论(Pleskac & Busemeyer, 2010)。该理论更强调决策的动态性，认为知觉和元认知都只依赖于刺激的感觉信息。只是在知觉决策之后，信息继续被加工，证据仍然在积累——刺激呈现与决策之间的间隔越长，积累的感觉证据就越多、夹杂的噪音也越多，或者说感觉信息质量越易改变，从而导致一级决策（知觉）与二级决策（元认知）之间的差异。在刺激呈现后、元认知判断之前的动作信息以动态方式参与元认知决策，既可能作为元认知证据提高决策质量，也可能作为噪音干扰元认知决策。

Maniscalco 和 Lau(2016)专门比较了三种模型（单通道模型、双通道模型和层级模型）。通过数据模拟和模型复杂性比较，他们发现层级模型能更好地解释知觉和元认知的表现分离。然而，Shekhar 和 Rahnev (2024)发现，以两阶段动态信号检测理论为代表的决策后模型并不是实验数据拟合的最佳方案。Shekhar 和 Rahnev(2024)提出了一个新的模型——logWEV 模型。该模型包含两个成分，第一个成分建立在他们之前提出的 LogN 模型上(Shekhar & Rahnev, 2021)，认为元认知噪音服从对数正态分布(lognormal distribution)，持续模糊并削弱信心的判断标准。另一个成分认为信心判断是基于知觉证据和刺激可见度两个

因素的加权总和，即 WEV(weighted evidence and visibility)模型(Rausch et al., 2020)。他们认为，新模型结合了元认知噪音和刺激可见度的双重影响，能优于单一的决策后模型解释实验数据。然而，Shekhar 和 Rahnev(2024)也指出，在某些实验条件下（如快速反应或持续刺激），仍可能存在包含动作反应信息的决策后加工。总之，关于层级模型的适用性以及元认知最优模型的构建仍需进一步研究。

3.1.2 元认知计算贝叶斯模型

单通道、双通道和层级模型要么强调元认知证据来源依附于知觉，要么强调元认知证据存在独立来源。Fleming 和 Daw(2017) 提出的元认知计算贝叶斯模型有两大核心假设：一是元认知和知觉具有不同但耦合(distinct but coupled)的证据来源，信心证据与知觉证据高度相关，因此信心计算时需考虑两者的协方差(Schulz et al., 2023)；二是知觉表现的自我评估应充分利用信心证据和自身行为，并基于贝叶斯计算描述元认知加工过程。该模型认为，自我反应传递了个体内在状态(Fleming, 2024)，与其它信心证据共同形成信心评估；反应不仅是信心评估的重要来源，也影响元认知监控和控制(Schulz et al., 2023)。因此，动作反应可能产生两个效应：一是动作反应之后的元认知评估具有更高元认知敏感性；二是动作反应后的元认知评估可能导致更低的元认知评分。这两个效应已在反应顺序研究中得到验证(Siedlecka et al., 2016; Wokke et al., 2020)。研究发现，反应先于元认知时，增加的动作信息有助于提高元认知效率。然而，操控反应顺序不仅改变了动作信息的可用性，还可能延长刺激与元认知评估之间的时间间隔，从而增加噪音并衰减信号。Schulz 等人(2023)认为，元认知效率的提升更可能源于动作信息增加，而非信号衰减（因为信号衰减会导致元认知效率下降）。总之，虽然已知动作信息和信号/噪音影响元认知，但如何分离这两者对元认知的具体作用，仍需进一步研究。

3.1.3 信心的‘噪音’-‘增效’权衡理论

Mamassian 和 de Gardelle(2022) 提出了一种基于信号检测论的生成模型(SDT-based generative model)，并借鉴了双通道模型的架构。该模型认为信心判断源于知觉决策和信心证据，并将信心证据分为两类：首要信心证据（知觉证据的副本和知觉决策的基础）和次要信心证据（用于信心判断的附加证据）。理想信心观察者仅依赖首要证据，而超理想观察者则完全依赖次要证据。该模型认为，信心计算受信心噪音(confidence noise)和信心增效(confidence boost)的权衡作用。信心噪音反映信心计算中的低效，会降低信心敏感性。信心增效是指未用于知觉决策，但用于信心判断的知觉后信息。这两个因素的权衡(trade-off)决

定了信心水平：信心增效高、噪音低时，信心较高；增效低、噪音高时，信心较低。在模型中，理想观察者和超理想观察者的比例体现在信心增效这一参数上。信心增效可能来自运动信号(Fleming et al., 2015; Wokke et al., 2020)、注意变化(Rahnev & Fleming, 2019) 及知觉决策后的进一步信息加工(Pleskac & Busemeyer, 2010)。由此，该模型同样可以解释运动信号或动作对信心加工的影响。

需要注意的是，尽管某些决策后模型（如层级模型和‘噪音-增效’权衡理论）一致认为感知后存在额外信心证据影响判断，但这些模型未明确界定这些证据的来源，这些来源不仅限于动作信息，还可能包括预期(Olawole-Scott & Yon, 2023)、唤醒度(Legrand et al., 2021)、动机(Hoven et al., 2022)等因素。虽然这些模型未专门解释动作信息对元认知的影响，但确为其提供了理论支持。本文介绍的与知觉决策相关的动作信息对元认知的影响(包括反应速度、动作强度、反应顺序、动作冲突、动作观察等对元认知的影响，见 Faivre et al., 2020; Fleming et al., 2015; Mazancieux et al., 2023; Palser et al., 2018; Sanchez et al., 2024; Siedlecka et al., 2021; Wokke et al., 2020)为这些模型提供了直接的实验证据。

3. 2 动作改变元认知的神经机制

Goodale 和 Milner (1992)首次提出，大脑中存在两条神经通路——腹侧通路(ventral stream)和背侧通路(dorsal stream)，分别负责视觉感知（如物体特征识别）和视觉引导的动作反应（如抓取物体）。进一步研究发现，目标导向行为中，目标的视觉特征和相关动作信息分别在两条通路中处理(Tang et al., 2022)。值得注意的是，腹侧和背侧通路之间并非完全隔离，而是存在信息交互(Milner, 2017)。Giarrocco 和 Averbeck(2021)发现，腹侧和背侧通路的交互信息通过后扣带回(posterior cingulate)和海马(hippocampus)整合后，最终汇聚至前额叶皮层(PFC)(Milner & Goodale, 1993, 1995)。而前额叶皮层恰恰是元认知加工的重要脑区。因此，腹侧通路的知觉信息与背侧通路的动作信息可能在此整合并加工，形成元认知判断，为动作影响元认知提供了神经基础。

近期的 fMRI 研究对信心评估相关脑区进行了精确定位，发现这些脑区主要集中在额顶叶和带状盖网络，特别是背侧前扣带回(dorsal anterior cingulate cortex)、辅助运动区(the supplementary motor area)、前额叶前部(the anterior prefrontal cortex)、顶下小叶(the inferior parietal lobe)、楔前叶(precuneus)和前脑岛(the anterior insula) (Qiu et al., 2018; Rouault & Fleming, 2020)。有研究比较了知觉决策后有无信心评估时的脑区激活，发现有信心评估时，左侧辅助运动区、左侧背侧前扣带回、左侧额下回岛盖部位及双侧楔前叶的激

活显著增加(Lei et al., 2020)。这些区域的激活，包括辅助运动区，提示元认知过程中可能涉及动作信息。尽管目前有关动作如何影响元认知的神经机制研究较少，但可以从以下几个方面进行初步探讨。

3.2.1 前额叶不同模块的功能特异性

有研究探讨了前额叶不同模块在元认知形成中的功能。Shekhar 和 Rahnev(2018)利用 TMS 研究发现，对背外侧前额叶皮层(dorsolateral PFC, DLPFC)施加 TMS 可降低信心评分，而对前额叶前部(anterior PFC, aPFC)施加 TMS 则提高了元认知能力。此外，研究表明，对左侧前额叶前部内侧皮层(anterior medial prefrontal cortex, aMPFC)施加连续 theta 节律刺激可显著提升元认知效率(Hobot et al., 2023)。这些结果表明，前额叶皮层的不同区域具有功能差异：背外侧前额叶皮层负责读出感觉证据、内感受信号和动作反应等信息，并将信息传递至前额叶前部，后者整合非知觉信息以做出元认知决策。因此，前额叶各模块的功能差异为知觉与元认知的分离提供了可能，并为动作改变元认知提供了神经基础。另一项结合 EEG 和 fMRI 技术的研究(Pereira et al., 2020)比较了个体在执行动作和观察他人动作时的元认知表现及其神经机制，发现个体在执行动作时元认知表现更好，表明动作执行通过积累更多证据提升元认知表现。研究还发现，在执行动作条件下，神经活动更早与信心相关联，且执行和观察条件下的共同激活差异早期出现在前脑岛，晚期出现在前额叶前部，表明在动作执行后，前脑岛首先检测到用于进行错误检测的第一类反应运动信号，并将其传递到前额叶前部，与信心证据结合形成信心判断。

3.2.2 动作与内在状态整合的神经基础

Fleming 和 Daw(2017) 认为，动作作为额外信息，需与被试的内在状态（如决策和信心加工变量）整合，才能形成元认知决策。他们提出了动作改变元认知的两个可能的关键脑区和神经回路。首先，额极皮层(frontopolar cortex, FPC; Brodmann area 10)可能负责动作与内在状态的整合。额极皮层从顶叶、额叶和颞叶的高级感觉和运动区接收多模态信息，并整合这些信息以支持元认知决策(Baird et al., 2013)。其次，背内侧前额叶皮层(dorsomedial prefrontal cortex, dmPFC，包含旁扣带回和前辅助运动区)也可能参与动作与状态的整合。前人发现，当被试做快速按键反应时，如果出现错误，在没有外部反馈情况下，背内侧前额叶皮层会激活增加，表明该区域与错误检测有关(Carter et al., 1998)。此外，背内侧前额叶皮层与脑岛和额极皮层相连，形成一个可能的元认知评估回路(Baird et al., 2013)。

动作与内在状态如何整合，或动作如何传递感觉信息以形成元认知决策？一种可能的

电生理机制是β波。研究表明，β振荡与感觉和运动加工密切相关(Pfurtscheller & Lopes da Silva, 1999)。例如，运动区的单侧化β波成分可提前预测下一步动作，说明β波与动作展开相关(Donner et al., 2009)。此外，β振荡支持长程神经交互作用(Siegel et al., 2012)，有助于维持当前的感知运动状态(Engel & Fries, 2010)。由于元认知需要整合动作和内在感知状态的信息，β波可能是两者整合的桥梁。Wokke 等人(2020)发现，当元认知判断发生在知觉判断之后（即动作信息可被元认知加工），运动区和前额叶的 β 波出现更高的相位同步——表明动作信息对元认知的影响与运动皮层和前额叶皮层的 β 波同步相关，即为动作信息影响元认知提供了直接的电生理证据。在控制实验中，若不要求元认知判断，相位同步消失，进一步表明β波在感知运动状态保持和元认知形成中发挥重要作用。

在信心决策过程中，整合动作(Wokke et al., 2020)、内在状态（包括内感受、本体感受）(Fleming, 2024)和视觉-时间线索(Charles et al., 2020)等信息，可能激活多个与单一维度信息加工相关的脑区。Jaeger 等人(2020)发现，信心决策的形成与三个独特的脑区组的共同激活有关，这些脑区的激活程度与信心水平正相关：信心越强，激活越显著。三个脑区组包括：右侧额-颞-顶中心区，左侧颞顶部和基底前脑，小脑。这些脑区互相独立，但分布非常广泛；它们首先独立加工信心形成中所依赖的各种信息，再进行信息整合。在这三个脑区组中，右侧额-颞-顶中心区所包含的额叶辅助眼区(supplementary eye field)是唯一一个既与信心决策(Gajdos et al., 2019)相关又与元认知效率(Fleming & Lau, 2014)相关的脑区，可能在整合动作信号和影响信心判断中发挥关键作用。

3.2.3 动作影响元认知过程中注意抑制的神经基础

动作信息作为信心证据，在与其他证据共同积累时，注意的作用不可忽视。近期研究支持了注意在信心证据积累中的作用。Sanchez 等人(2023)研究了动作准备对信心判断的影响。实验中，研究者在刺激呈现前提供反应线索，提示被试使用特定手进行反应。结果显示，当线索与实际反应不一致时，信心反而比一致时更高，同时伴随更高 P2 波幅。P2 波幅与认知控制(Xie et al., 2020)和早期注意资源分配(Ghin et al., 2022)相关。不一致试次中的较高 P2 波幅表明，对前期不匹配的动作准备分配了更多的注意资源，从而进行更强的抑制。这种更强的抑制被整合入信心证据，从而产生更高的信心。

此外，动作信息对元认知决策的影响还可能通过α抑制现象反映出来。α波抑制被视为注意闸门的具体体现，其典型特征是抑制分心刺激(Foxe & Snyder, 2011)。例如，处理潜在分心信息的脑区会显示更高的α波功率(Foxe et al., 1998)。Faivre 等人(2018)研究了跨通道的

元认知，发现低信心与高 α 波功率相关，表现为 α 抑制。这可能是因为低信心时，个体忙于抑制分心信息，未能有效关注第一类反应的动作信息（如动作准备和反应时间），从而导致低信心。因此，虽然动作信息在元认知决策中起到重要作用，但能否注意到动作信息可能受噪音影响，噪音大时，α 抑制发挥作用，动作信息不被注意，导致低信心。最近的另一项研究专门探讨了 α 振荡在知觉决策中的作用(Di Gregorio et al., 2022)。他们发现刺激呈现之前的α波的快频率与正确反应相关，而慢频率与错误反应相关；α波的波幅则与信心有关。刺激呈现之后的 α 波频率对正确率没有影响，而低 α 波幅与高信心评估和元认知敏感性相关联。此外，通过 TMS 调节，研究发现刺激呈现前的α调节只能改变反应敏感性，不能改变元认知表现，而在刺激呈现之后信心判断之前（中间有知觉反应）的 α 调节只能改变元认知敏感性，不能改变反应敏感性。该研究不仅表明反应和信心是分离的，还为 α 波速度和波幅在神经机制上的双分离提供了因果证据。综合以上研究，动作信息在被整合入元认知证据以形成元认知判断时，注意主要以抑制的方式产生作用。抑制可能是对无关动作准备的抑制，从而导致信心的升高；也可能是对证据累积过程中无关噪音的抑制，从而忽略动作信息，导致信心降低。

总之，我们尝试列出不同层次的动作改变元认知的神经机制。综合现有的实验证据和理论解释，人类可能通过以额叶皮层为核心的脑网络，依托β振荡和α抑制等电生理机制，借助注意监控实现动作信息与其它证据的整合，形成元认知。然而，目前关于动作影响元认知的神经机制研究尚不充分，尽管发现了注意在其中的作用，但尚未直接调控注意。未来需更多实证研究，以全面揭示动作改变元认知的神经机制。

4 总结与展望

综上所述，动作对元认知的影响已经在多个研究中被证实。动作的各个方面，比如反应速度、动作强度、反应顺序、动作冲突信息等，都会影响元认知的表现。当前动作影响元认知的研究方兴未艾，相关实验事实和理论解释亟待进一步探索。如果要进一步厘清动作影响元认知的诸多争论，特别是厘清知觉证据与元认知证据的依存程度、关联方式和组织结构，可以考虑从以下几方面入手深化研究。

4.1 探索动作改变元认知的边界条件

尽管大量研究表明动作会影响以信心判断为代表的元认知，但也有研究发现，动作不一定在所有情况下都会影响元认知，尤其是在一些关键衍生指标（如元认知敏感性、元认知效率和信心-正确率回归斜率）上未见显著效应。比如 Charles 等人(2020)比较了自发动作

（被试自己移动）、被动动作（机器手带着被试手指移动）和观察动作（被试观察视频中的手指动作）三种条件对元认知的影响。结果表明，在知觉判断上，自发动作的正确率最高，但被动动作与观察动作之间无差异；在信心评分上，自发动作信心评分最高，被动动作居中，观察动作最低，但三者的元认知敏感性和效率无显著差异。不同的动作条件提供了不同的信息：自发动作依赖内感受、本体感受和视觉-时间线索；被动动作依赖本体感受和视觉-时间线索；而观察动作则仅依赖视觉-时间线索。这些不同的信息可能使信心评分产生偏差，但并未改变元认知能力。另外，Filevich 等人(2020) 比较了外显知觉判断与内隐知觉判断对元认知的影响，意外地发现两者在元认知表现（无论是回归系数还是元认知效率）上并无差异。此外，当要求被试做出实时刺激特征判断时，尽管信心评分有所增加，但并未改变元认知表现。他们认为，元认知评估并不总是整合动作信息。

上述研究表明，动作对元认知表现和能力的影响并不一致，因此动作对元认知的作用可能存在边界条件。一种可能的解释就是，信心评分指标(Gajdos et al., 2019)与在其基础上衍生的元认知指标(Fleming & Lau, 2014; Rausch et al., 2023)存在重大差异，不同指标可能反映不同的效应和认知加工机制。另一种可能的解释是，在某些情境下，元认知表现出较高的稳定性，难以改变(Charles et al., 2020; Filevich et al., 2020)；尤其是当实验任务或知觉任务较为复杂时，认知资源被用于任务监控和执行，难以进行合理的元认知评估。这两种假设的适用性及其对实验结果的解释仍需进一步实证验证。通过探讨关键边界条件，有助于深入理解知觉证据与元认知证据的关联与组织结构的稳定性。特别是动作信息的哪些方面，例如反应速度(Patel et al., 2012)、动作强度(Gajdos et al., 2019)、反应顺序(Wokke et al., 2020)、动作冲突(Siedlecka et al., 2020)、动作观察(Palmer et al., 2016)等，是以何种权重参与元认知加工，以及是否以某种线性或非线性组合方式与元认知判断相关。此外，还可进一步探索不同感觉通道的动作信息是否以跨通道整合(Scheliga et al., 2023)方式影响元认知。

4. 2 重新思考元认知——信心到底是什么？

要理解动作信息如何影响知觉信心，首先需明确知觉信心的含义。有一类观点认为知觉信心反映了一个决定是正确的可能性(比如，Sanders et al., 2016)。还有一类观点则认为，信心反映的是赞成某个决定的证据量，而对反对这个决定的证据相对不敏感(比如，Samaha & Denison, 2022; Samaha et al., 2019)；换句话说，人们在进行信心判断时，过度依赖与决定一致的证据，采取次优启发策略，而不是采取综合考虑不一致证据的最优计算策略。

Maniscalco 等人(2021)提出的差异调谐抑制(differential tuned inhibition)理论进一步支持

了信心反映证据量的观点。该理论认为，神经元受到其它具有相反调谐偏好的神经元的抑制，抑制程度决定神经元在知觉辨别和信心判断中的作用。具体来说，被强抑制的差分(differencing)神经元编码不同知觉解释（如左或右），推动知觉决策；而被弱抑制的累积(accumulation)神经元则编码偏向某一知觉解释的证据，忽略其它的解释（比如：右），推动信心判断。因此高调谐抑制神经元负责计算知觉解释的相对证据，决定知觉决策；而低调谐抑制神经元则计算绝对证据，决定信心判断；不同的调谐抑制神经元导致知觉与信心的分离。Mamassian 和 de Gardelle(2022)提出的模型则认为，知觉决策的信心源自对知觉反应一致性(self-consistency)的主观估计，即相同条件下做出相同决策的概率。用信号检测论的术语讲，传统信心的定义在强调决策的正确率(accuracy)，而这里的信心定义则强调不受偏差(bias)影响的被试的某种敏感性(sensitivity)。这种信心的定义可以很好地解释错觉，在错觉中被试总能稳定地做出同样的错误决定，传统信心理论认为这是对信心（正确的主观概率）的过高估计，而 Mamassian 和 de Gardelle(2022)模型则认为此时被试具有较好的自我一致性，而不是信心过高估计。在某种程度上，这个模型也同样支持信心反映的是赞成某个决定的证据量。近期也有研究将信心与任务的先验信念关联(Van Marcke et al., 2024)，或认为信心本身是元认知监控的目标，而非结果(Lee et al., 2023)。

关于“信心究竟反映了什么”的两种观点均能解释动作对信心的影响。一方面，如果信心反映的是某个决定是正确的可能性，那么由于动作反应的速度、强度等信息均能影响对该反应正确性的主观评估，因此更快的反应速度、更大的反应强度都会导致信心增加。另一方面，如果信心反映的是赞成某个决定的证据量，那么由于动作信息的加入会改变神经元的调谐程度，因此更快动作反应速度、更大反应强度会使神经元的调谐抑制变小，从而提高信心。然而，行为指标无法区别这两种关于信心内容的假说，一个可能的探索方向是通过将神经科学手段与对动作反应速度(Patel et al., 2012)、动作强度(Gajdos et al., 2019)等动作信息的操纵相结合，利用关键神经指标，探索行为指标上无法区分但具有明显预期差异的两种信心假说的元认知神经对应物(neural correlates of metacognition, NCM) (Overhoff et al., 2021)。根据前人研究，两个关键的脑电成分——后部错误正波(posterior error positivity, Pe)和中顶部正波(centro-parietal positivity, CPP)，有可能分别与上述两种信心假设相关，从而帮助区分这两种假设。具体讲，Pe 出现在知觉判断后的 200 至 400 毫秒内，其波幅随着个体对错误判断信心的增加而增大，反映了个体对知觉判断正确性的监控(Boldt & Yeung, 2015; Feuerriegel et al., 2022)。CPP 则通常发生在知觉刺激呈现后和个体做出知觉判断前，

波幅随着信心增强而增大(Gherman & Philiastides, 2015; Rausch et al., 2020)，反映了支持所选选项的证据积累程度(Kelly et al., 2021; Philiastides et al., 2014)。例如，Ko 等人(2024) 通过两种分析方法确定 CPP 的时间窗口：一种是刺激呈现后 350 至 500 毫秒，另一种是反应前 130 至 70 毫秒。研究还发现，在知觉判断后的反应阶段和信心判断前，电极点上仍能观察到证据积累的神经反应，这一成分被称为“选择后 CPP”(post-choice CPP) (Grogan et al., 2023)。因此，信心假设一（信心反映决定正确性）可能与 Pe 相关，而信心假设二（信心反映证据积累量）可能与 CPP 有关。未来可通过比较动作信息操控下，两个 NCM 与信心评分的相关性，进一步区分这两种信心假设。总之，只有厘清了信心所真正反映的心理内容，才能更好地解释动作如何改变元认知的认知和神经机制。

4.3 探索特殊人群的元认知表现

目前，大多数研究集中于健康成人群体。研究发现，前运动皮层 TMS 刺激会影响健康个体的元认知(Fleming et al., 2015)。那么，运动障碍群体的动作-元认知关系是否也会受到影响？研究表明，运动障碍患者在推断他人动作信心方面存在困难。Macerollo 等人(2015) 采用与 Patel 等人(2012)相同的观察范式，比较了帕金森症患者、功能性运动障碍患者（如功能性颤抖或肌张力障碍）与健康个体在推断他人动作信心上的表现。结果显示，所有被试均表现出速度与信心推断之间的负相关——即观察到的速度越慢，信心推断越低。但进一步分析发现，当录像中的人物以较快速度移动弹珠进行知觉判断时，健康被试的信心推断显著高于运动障碍患者，表明运动执行系统在从观察到的动作中推断信心时发挥了作用。此外，部分研究探讨了患有运动障碍的神经障碍患者（如基底神经节损伤、神经退行性病变、白质疾病及获得性脑损伤）的元认知表现。这些研究主要比较了神经障碍患者与正常被试在自我或他人动作错误检测上的差异。近期综述(Pezzetta et al., 2022)总结了相关研究结果，发现虽然神经障碍患者在行为上未表现出明显的错误加工异常，但大多数患者在脑电图中，尤其是在评估自我错误反应时，ERN 波幅显著降低。

此外，关于动作与元认知关联的研究，仍需加强对有代表性的两类特殊群体的研究。首先是自闭症儿童，尽管他们通常没有显著的运动障碍，但部分患者存在姿势控制不规范，并在步态、上肢运动和精细运动控制上与正常儿童有明显差异(Cook, 2016)。已有研究表明自闭症儿童在知觉与动作之间存在相互影响，但其运动表现与元认知表现之间的关系尚需进一步探讨。另一类特殊群体是脊髓损伤所导致的截瘫患者(paraplegic spinal cord injury patients)，这些患者的运动和感觉中枢以及外周效应器和外周神经系统均没有器质性病变；

但由于脊髓损伤，大脑与效应器和感受器的神经信号往来被完全切断。目前，尽管有研究显示脊髓损伤患者的知觉决策与健康人不同(见综述 Moro et al., 2022)。但一个尚未被研究的问题就是，纯粹的感觉传入神经阻滞和运动传出神经阻滞(somatic deafferentation and motor deefferentation)在多大程度上影响动作与元认知的关联。总之，从特殊群体入手，研究存在非典型动作或运动障碍时的元认知表现，有助于帮助我们揭示动作影响元认知的必要条件与专属机制。

参考文献

Al-Maghrabi, M., Mamede, S., Schmidt, H. G., Omair, A., Al-Nasser, S., & Magzoub, M. E. M. A. (2024). Overconfidence, Time-on-Task, and Medical Errors: Is There a Relationship? *Advances in Medical Education and Practice*, *15*, 133−140. https://doi.org/10.2147/AMEP.S442689

Baird, B., Smallwood, J., Gorgolewski, K. J., & Margulies, D. S. (2013). Medial and lateral networks in anterior prefrontal cortex support meta-cognitive ability for memory and perception. *Journal of Neuroscience*, *33*(42), 16657−16665. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0786-13.2013

Boldt, A., & Gilbert, S. J. (2022). Partially overlapping neural correlates of metacognitive monitoring and metacognitive control. *Journal of Neuroscience*, *42*(17), 3622−3635. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1326-21.2022

Boldt, A., & Yeung, N. (2015). Shared neural markers of decision confidence and error detection. *Journal of Neuroscience*, *35*(8), 3478−3484. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0797-14.2015

Brouillet, D., Brouillet, T., & Versace, R. (2023). Motor fluency makes it possible to integrate the components of the trace in memory and facilitates its re-construction. *Memory & Cognition*, *51*(2), 336−348. https://doi.org/10.3758/s13421-022-01350-x

Cardellicchio, P., Dolfini, E., Hilt, P. M., Fadiga, L., & D'Ausilio, A. (2020). Motor cortical inhibition during concurrent action execution and action observation. *NeuroImage*, *208*, 116445. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116445

Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, *280*(5364), 747−749. https://doi.org/10.1126/science.280.5364.747

Charles, L., Chardin, C., & Haggard, P. (2020). Evidence for metacognitive bias in perception of voluntary action. *Cognition*, *194*, 104041. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.104041

Chye, S., Valappil, A. C., Wright, D. J., Frank, C., Shearer, D. A., Tyler, C. J.,…Bruton, A. M. (2022). The effects of combined action observation and motor imagery on corticospinal excitability and movement outcomes: Two meta-analyses. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *143*, 104911. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104911

Cook, J. (2016). From movement kinematics to social cognition: the case of autism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *371*(1693), 20150372. https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0372

Desender, K., Donner, T. H., & Verguts, T. (2021). Dynamic expressions of confidence within an evidence accumulation framework. *Cognition*, *207*, 104522. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104522

Dhingra, B., & Yadav, M. (2024). An empirical analysis of overconfidence behaviour in the Indian ETF market. *International Journal of Revenue Management*, *14*(1), 72−94. https://doi.org/10.1504/IJRM.2024.135964

Di Gregorio, F., Trajkovic, J., Roperti, C., Marcantoni, E., Di Luzio, P., Avenanti, A.,…Romei, V. (2022). Tuning alpha rhythms to shape conscious visual perception. *Current Biology*, *32*(5), 988-998. https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.01.003

Di Luzio, P., Tarasi, L., Silvanto, J., Avenanti, A., & Romei, V. (2022). Human perceptual and metacognitive decision-making rely on distinct brain networks. *PLoS biology*, *20*(8), e3001750. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001750

Donner, T. H., Siegel, M., Fries, P., & Engel, A. K. (2009). Buildup of Choice-Predictive Activity in Human Motor Cortex during Perceptual Decision Making. *Current Biology*, *19*, 1581−1585. https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.07.066

Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations — signalling the status quo. *Current Opinion in Neurobiology*, *20*, 156−165. https://doi.org/10.1016/j.conb.2010.02.015

Faivre, N., Filevich, E., Solovey, G., Kühn, S., & Blanke, O. (2018). Behavioral, Modeling, and Electrophysiological Evidence for Supramodality in Human Metacognition. *Journal of Neuroscience*, *38*(2), 263−277. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0322-17.2017

Faivre, N., Vuillaume, L., Bernasconi, F., Salomon, R., Blanke, O., & Cleeremans, A. (2020). Sensorimotor conflicts alter metacognitive and action monitoring. *Cortex*, *124*, 224−234. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.12.001

Feuerriegel, D., Murphy, M., Konski, A., Mepani, V., Sun, J., Hester, R., & Bode, S. (2022). Electrophysiological correlates of confidence differ across correct and erroneous perceptual decisions. *NeuroImage*, *259*, 119447. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119447

Filevich, E., Koß, C., & Faivre, N. (2020). Response-Related Signals Increase Confidence But Not Metacognitive Performance. *Eneuro*, *7*(3), 1−14. https://doi.org/10.1523/ENEURO.0326-19.2020

Fleming, S. M. (2024). Metacagnition and confidence: a review and synthesis. *Annual Review of Psychology*, *75*, 241−268. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-022423-032425

Fleming, S. M., & Daw, N. D. (2017). Self-Evaluation of Decision-Making: A General Bayesian Framework for Metacognitive Computation. *Psychological Review*, *124*(1), 91−114. https://doi.org/10.1037/rev0000045

Fleming, S. M., & Lau, H. (2014). How to measure metacognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 443. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00443

Fleming, S. M., Maniscalco, B., Ko, Y. D., Amendi, N., Ro, T., & Lau, H. (2015). Action-specific disruption of perceptual confidence. *Psychological Science*, *26*, 89−98. https://doi.org/10.1177/0956797614557697

Foxe, J. J., Simpson, G. V., & Ahlfors, S. P. (1998). Parieto-occipital ~10 Hz activity reflects anticipatory state of visual attention mechanisms. *NeuroReport*, *9*(17), 3929−3933. https://doi.org/10.1097/00001756-199812010-00030

Foxe, J. J., & Snyder, A. C. (2011). The Role of Alpha-Band Brain Oscillations as a Sensory Suppression Mechanism during Selective Attention. *Frontiers in Psychology*, *2*, 10747. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00154

Gajdos, T., Fleming, S. M., Saez Garcia, M., Weindel, G., & Davranche, K. (2019). Revealing subthreshold motor contributions to perceptual confidence. *Neuroscience of Consciousness*, *2019*(1), niz001. https://doi.org/10.1093/nc/niz001

Geurts, L. S., Cooke, J. R., van Bergen, R. S., & Jehee, J. F. (2022). Subjective confidence reflects representation of Bayesian probability in cortex. *Nature Human Behaviour*, *6*(2), 294−305. https://doi.org/10.1038/s41562-021-01247-w

Gherman, S., & Philiastides, M. G. (2015). Neural representations of confidence emerge from the process of decision formation during perceptual choices. *NeuroImage*, *106*, 134−143. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.11.036

Ghin, F., Stock, A. K., & Beste, C. (2022). The importance of resource allocation for the interplay between automatic and cognitive control in response inhibition–an EEG source localization study. *Cortex*, *155*, 202−217. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.07.004

Giarrocco, F., & Averbeck, B. B. (2021). Organization of parietoprefrontal and temporoprefrontal networks in the macaque. *Journal of Neurophysiology*, *126*(4), 1289−1309. https://doi.org/10.1152/jn.00092.2021

Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in neurosciences*, *15*(1), 20−25. https://doi.org/10.1016/0166-2236(92)90344-8

Grogan, J. P., Rys, W., Kelly, S. P., & O'Connell, R. G. (2023). Confidence is predicted by pre- and post-choice decision signal dynamics. *Imaging neuroscience*, *1*, 1−23. https://doi.org/10.1162/imag_a_00005

Hobot, J., Koculak, M., Paulewicz, B., Sandberg, K., & Wierzchoń, M. (2020). Transcranial Magnetic Stimulation-Induced Motor Cortex Activity Influences Visual Awareness Judgments. *Frontiers in Neuroscience*, *14*, 580712. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.580712

Hobot, J., Skora, Z., Wierzchoń, M., & Sandberg, K. (2023). Continuous Theta Burst Stimulation to the left anterior medial prefrontal cortex influences metacognitive efficiency. *NeuroImage*, *272*, 119991. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119991

Hoven, M., Brunner, G., de Boer, N. S., Goudriaan, A. E., Denys, D., van Holst, R. J.,…Lebreton, M. (2022). Motivational signals disrupt metacognitive signals in the human ventromedial prefrontal cortex. *Communications biology, 5(1),* 244. https://doi.org/10.1038/s42003-022-03197-z

Kelly, S. P., Corbett, E. A., & O'Connell, R. G. (2021). Neurocomputational mechanisms of prior-informed perceptual decision-making in humans. *Nature Human Behaviour*, *5*(4), 467−481. https://doi.org/10.1038/s41562-020-00967-9

Ko, Y. H., Zhou, A., Niessen, E., Stahl, J., Weiss, P. H., Hester, R.,…Feuerriegel, D. (2024). Neural correlates of confidence during decision formation in a perceptual judgment task. *Cortex*, *173*, 248−262. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2024.01.006

Lapate, R. C., Samaha, J., Rokers, B., Postle, B. R., & Davidson, R. J. (2020). Perceptual metacognition of human faces is causally supported by function of the lateral prefrontal cortex. *Communications biology*, *3*(1), 360. https://doi.org/10.1038/s42003-020-1049-3

Lau, H., & Rosenthal, D. (2011). Empirical support for higher-order theories of conscious awareness. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*, 365−373. https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.05.009

Lebensfeld, T. C., & Smalarz, L. (2024). Witnessing-condition information differentially affects evaluations of high- and moderate-confidence eyewitness identifications. *Cognition*, *250*, 105841. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2024.105841

Lee, D. G., Daunizeau, J., & Pezzulo, G. (2023). Evidence or confidence: What is really monitored during a decision? *Psychonomic Bulletin & Review*, *30*(4), 1360−1379. https://doi.org/10.3758/s13423-023-02255-9

Legrand, N., Engen, S. S., Correa, C. M. C., Mathiasen, N. K., Nikolova, N., Fardo, F., & Allen, M. (2021). Emotional metacognition: stimulus valence modulates cardiac arousal and metamemory. *Cognition and Emotion*, *35*(4), 705−721. https://doi.org/10.1080/02699931.2020.1859993

Lei, W., Chen, J., Yang, C., Guo, Y., Feng, P., Feng, T., & Li, H. (2020). Metacognition-related regions modulate the reactivity effect of confidence ratings on perceptual decision-making. *Neuropsychologia*, *144*, 107502. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107502

Macerollo, A., Bose, S., Ricciardi, L., Edwards, M. J., & Kilner, J. M. (2015). Linking differences in action perception with differences in action execution. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *10*(8), 1121−1127. https://doi.org/10.1093/scan/nsu161

MacNeil, S. L., Wood, E., & Arslantas, F. (2024). Development of a metacognition co-curriculum for a university

course in introductory organic chemistry. In *Frontiers in Education* (Vol. 9, pp. 1402599). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1402599

Mamassian, P., & de Gardelle, V. (2022). Modeling Perceptual Confidence and the Confidence Forced-Choice Paradigm. *Psychological Review*, *129*(5), 976. https://doi.org/10.1037/rev0000312

Maniscalco, B., Castaneda, O. G., Odegaard, B., Morales, J., Rajananda, S., & Peters, M. A. (2020). *The metaperceptual function: Exploring dissociations between confidence and task performance with type 2 psychometric curves. PsyArxiv 2020*. https://doi.org/10.31234/osf.io/5qrjn

Maniscalco, B., & Lau, H. (2012). A signal detection theoretic approach for estimating metacognitive sensitivity from confidence ratings. *Consciousness and Cognition*, *21*(1), 422−430. https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.09.021

Maniscalco, B., & Lau, H. (2016). The signal processing architecture underlying subjective reports of sensory awareness. *Neuroscience of Consciousness*, *2016*(1), 1−17. https://doi.org/10.1093/nc/niw002

Maniscalco, B., Odegaard, B., Grimaldi, P., Cho, S. H., & Peters, M. A. (2021). Tuned inhibition in perceptual decision-making circuits can explain seemingly suboptimal confidence behavior. *PLoS Computational Biology*, *17*(3), e1008779. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008779

Mazancieux, A., Pereira, M., Faivre, N., Mamassian, P., & Moulin, C. (2023). Towards a common conceptual space for metacognition in perception and memory. *Nature Reviews Psychology*, *2*, 751−766. https://doi.org/10.1038/s44159-023-00245-1

Milner, A. D. (2017). How do the two visual streams interact with each other? *Experimental brain research*, *235*(3), 1297−1308. https://doi.org/10.1007/s00221-017-4917-4

Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in brain research*, *95*, 317−337. https://doi.org/10.1016/s0079-6123(08)60379-9

Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The Visual Brain in Action*. Oxford University Press.

Milshtein, D., Henik, A., Ben-Zedeff, E. H., & Milstein, U. (2024). Mind on the battlefield: what can cognitive science add to the military lessons-learned process? *Defence Studies*, *24*(2), 277−298. https://doi.org/10.1080/14702436.2024.2316138

Moro, V., Scandola, M., & Aglioti, S. M. (2022). What the study of spinal cord injured patients can tell us about the significance of the body in cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(6), 2052−2069. https://doi.org/10.3758/s13423-022-02129-6

Olawole-Scott, H., & Yon, D. (2023). Expectations about precision bias metacognition and awareness. *Journal of Experimental Psychology: General*, *152*(8), 2177−2189. https://doi.org/https://doi.org/10.1037/xge0001371

Overhoff, H., Ko, Y. H., Feuerriegel, D., Fink, G. R., Stahl, J., Weiss, P. H.,…Niessen, E. (2021). Neural correlates of metacognition across the adult lifespan. *Neurobiology of Aging*, *108*, 34−46. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2021.08.001

Overhoff, H., Ko, Y. H., Fink, G. R., Weiss, P. H., Stahl, J., Bode, S., & Niessen, E. (2022). The relationship between response dynamics and the formation of confidence varies across the lifespan. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *14*, 969074. https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.969074

Palmer, C. E., Bunday, K. L., Davare, M., & Kilner, J. M. (2016). A Causal Role for Primary Motor Cortex in Perception of Observed Actions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *28*(12), 2021−2029. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01015

Palser, E. R., Fotopoulou, A., & Kilner, J. M. (2018). Altering movement parameters disrupts metacognitive accuracy. *Consciousness & Cognition*, *57*, 33−40. https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.11.005

Patel, D., Fleming, S. M., & Kilner, J. M. (2012). Inferring subjective states through the observation of actions.

Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, *279*(1748), 4853−4860. https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1847

Pereira, M., Faivre, N., Iturrate, I., Wirthlin, M., Serafini, L., Stéphanie, M.,…Millán, J. D. R. (2020). Disentangling the origins of confidence in speeded perceptual judgments through multimodal imaging running title: decision commitment improves confidence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(15), 8382−8390. https://doi.org/10.1073/pnas.1918335117

Pezzetta, R., Wokke, M. E., Aglioti, S. M., & Ridderinkhof, K. R. (2022). Doing it wrong: a systematic review on electrocortical and behavioral correlates of error monitoring in patients with neurological disorders. *Neuroscience*, *486*, 103−125. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2021.01.027

Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*, *110*(11), 1842−1857. https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00141-8

Philiastides, M. G., Heekeren, H. R., & Sajda, P. (2014). Human scalp potentials reflect a mixture of decision-related signals during perceptual choices. *Journal of Neuroscience*, *24*(50), 16877−16889. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3012-14.2014

Pleskac, T. J., & Busemeyer, J. R. (2010). Two-stage dynamic signal detection: a theory of choice, decision time, and confidence. *Psychological Review*, *117*(3), 864-901. https://doi.org/10.1037/a0019737

Qiu, L., Su, J., Ni, Y., Bai, Y., Zhang, X., Li, X., & Wan, X. (2018). The neural system of metacognition ccompanying decision-making in the prefrontal cortex. *PLoS biology*, *16*(4), e2004037. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004037

Qiu, S., Cheng, X., CHeng, Z., Cao, J., Fan, Z., & Ding, X. (2024). Physical effort modulates perceptual awareness judgment independent of level of processing. *Consciousness and Cognition*, *124*, 103746. https://doi.org/10.1016/j.concog.2024.103746

Rahnev, D., Desender, K., Lee, A. L. F., Adler, W. T., Aguilar-Lleyda D, Akdogan, B.,…Double, K. (2020). The confidence database. *Nature Human Behaviour*, *4*(3), 317−325. https://doi.org/10.1038/s41562-019-0813-1

Rahnev, D., & Fleming, S. M. (2019). How experimental procedures influence estimates of metacognitive ability. *Neuroscience of Consciousness*, *5*(1), niz009. https://doi.org/10.1093/nc/niz009

Rausch, M., Hellmann, S., & Zehetleitner, M. (2023). Measures of metacognitive efficiency across cognitive models of decision confidence. *Psychological Methods*, 10.1037/met0000634. Advance online publication. https://doi.org/10.1037/met0000634

Rausch, M., Zehetleitner, M., Steinhauser, M., & Maier, M. E. (2020). Cognitive modelling reveals distinct electrophysiological markers of decision confidence and error monitoring. *NeuroImage*, *218*, 116963. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116963

Rollwage, M., Loosen, A., Hauser, T. U., Moran, R., & Fleming, S. M. (2020). Confidence drives a neural confirmation bias. *Nature Communications*, *11*(1), 2634. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16278-6

Rouault, M., & Fleming, S. M. (2020). Formation of global self-beliefs in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(44), 27268−27276. https://doi.org/10.1073/pnas.200309411

Samaha, J., & Denison, R. (2022). The positive evidence bias in perceptual confidence is unlikely post-decisional. *Neuroscience of Consciousness*, *2022*(1), 1−8. https://doi.org/10.1093/nc/niac010

Samaha, J., Switzky, M., & Postle, B. R. (2019). Confidence boosts serial dependence in orientation estimation. *Journal of vision*, *19*(4), 25. https://doi.org/10.1167/19.4.25

Sanchez, R., Courant, A., Desantis, A., & Gajdos, T. (2024). Making precise movements increases confidence in perceptual decisions. *Cognition*, *249*, 105832. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2024.105832

Sanchez, R., Davranche, K., Gajdos, T., & Desantis, A. (2023). Action monitoring boosts perceptual confidence. *BioRxiv*, *2023–08*. https://doi.org/10.1101/2023.08.14.553210

Sanders, J. I., Hangya, B., & Kepecs, A. (2016). Signatures of a Statistical Computation in the Human Sense of Confidence. *Neuron*, *90*(3), 499–506. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.03.025

Scheliga, S., Kellermann, T., Lampert, A., Rolke, R., Spehr, M., & Habel, U. (2023). Neural correlates of multisensory integration in the human brain: an ALE meta-analysis. *Reviews in the Neurosciences*, *34*(2), 223–245. https://doi.org/10.1515/revneuro-2022-0065

Schulz, L., Fleming, S. M., & Dayan, P. (2023). Metacognitive computations for information search: Confidence in control. *Psychological Review*, *130*(3), 604–639. https://doi.org/10.1037/rev0000401

Shekhar, M., & Rahnev, D. (2018). Distinguishing the roles of dorsolateral and anterior PFC in visual metacognition. *Journal of Neuroscience*, *38*(22), 5078–5087. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3484-17.2018

Shekhar, M., & Rahnev, D. (2021). The nature of metacognitive inefficiency in perceptual decision making. *Psychological Review*, *128*(1), 45–70. https://doi.org/10.1037/rev0000249

Shekhar, M., & Rahnev, D. (2024). How do humans give confidence? A comprehensive comparison of process models of metacognition. *Journal of Experimental Psychology: General*, *153*(3), 656–688. https://doi.org/10.1037/xge0001524

Siedlecka, M., Hobot, J., Skora, Z., Paulewicz, B., Timmermans, B., & Wierzchoń, M. (2019). Motor response influences perceptual awareness judgements. *Consciousness and Cognition*, *75*, 102804. https://doi.org/10.1016/j.concog.2019.102804

Siedlecka, M., Koculak, M., & Paulewicz, B. (2021). Confidence in action: Differences between perceived accuracy of decision and motor response. *Psychonomic Bulletin & Review*, *28*(5), 1698–1706. https://doi.org/10.3758/s13423-021-01913-0

Siedlecka, M., Paulewicz, B., & Koculak, M. (2020). Task-related motor response inflates confidence. *BioRxiv*, 2020–2003. https://doi.org/10.1101/2020.03.26.010306

Siedlecka, M., Paulewicz, B., & Wierzchoń, M. (2016). But I was so sure! Metacognitive judgments are less accurate given prospectively than retrospectively. *Frontiers in Psychology*, *7*, 171892. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00218

Siegel, M., Donner, T. H., & Engel, A. K. (2012). Spectral fngerprints of large-scale neuronal interactions. *Nature Reviews Neuroscience*, *13*, 20–25. https://doi.org/10.1038/nrn3137

Tang, H., Costa, V. D., Bartolo, R., & Averbeck, B. B. (2022). Differential coding of goals and actions in ventral and dorsal corticostriatal circuits during goal-directed behavior. *Cell Reports*, *38*(1), 110198. https://doi.org/10.1016/j.celrep.2021.110198

Turner, W., Angdias, R., Feuerriegel, D., Chong, T. J., & Bode, S. (2021). Perceptual decision confidence is sensitive to forgone physical effort expenditure. *Cognition*, *207*(1), 104525. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104525

Van Marcke, H., Denmat, P. L., Verguts, T., & Desender, K. (2024). Manipulating Prior Beliefs Causally Induces Under- and Overconfidence. *Psychological Science*, *35*(4), 358–375. https://doi.org/10.1177/09567976241231572

Wokke, M. E., Achoui, D., & Cleeremans, A. (2020). Action information contributes to metacognitive decision-making. *Scientific Reports*, *10*(1), 3632. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60382-y

Wokke, M. E., Cleeremans, A., & Ridderinkhof, K. R. (2017). Sure I'm Sure: Prefrontal Oscillations Support Metacognitive Monitoring of Decision Making. *Journal of Neuroscience*, *37*(4), 781–789. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1612-16.2016

Xie, L., Cao, B., Li, Z., & Li, F. (2020). Neural dynamics of cognitive control in various types of incongruence.

Frontiers in Human Neuroscience, *14*, 214. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00214
Yeung, N., & Summerfield, C. (2012). Metacognition in human decision-making: confidence and error monitoring. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, *367*(1594), 1310−1321. https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0416

How does action influence metacognition? — An exploration based on cognitive models and neural mechanisms

CHENG Xiaorong, QIU Shiming, DING Xianfeng, FAN Zhao

(Key Laboratory of Adolescent Cyberpsychology and Behavior (CCNU), Ministry of Education; Key Laboratory of Human Development and Mental Health of Hubei Province; School of Psychology, Central China Normal University (CCNU), Wuhan 430079, China)

Abstract: Action and metacognition are crucial components of cognitive processing. Metacognition reflects an individual's representation, monitoring, and regulation of cognitive processes, while actions serve as vital means for the output of internal cognitive processing, particularly decision-making information. Recent research has demonstrated that various aspects of action—such as response speed, intensity, sequence, conflict, and observation—can influence metacognition. From the perspective of cognitive models, post-decision models of metacognition are well-suited to explaining experimental evidence regarding the impact of action on metacognition. These models propose that the information used for metacognitive evaluation (metacognitive evidence) differs from but is related to that used for perceptual judgment (perceptual evidence), focusing respectively on hierarchical processing, Bayesian computation, and confidence enhancement. From the perspective of neural mechanisms, actions and perceptual information may be integrated through brain networks centered on the prefrontal cortex, relying on electrophysiological mechanisms such as β oscillations and α inhibition, with metacognition shaped under the regulation of attention. Future research could further explore the boundary conditions under which actions alter metacognition, the true meaning of confidence, and the metacognitive performance of special populations.

Key words: action, metacognition, perceptual judgment, confidence evaluation, cognitive and neural mechanisms